

УДК 621.778:537-8

В. В. Клубович

Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», Минск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ

Приведены результаты исследования влияния ультразвуковых колебаний на физико-механические свойства разнородных материалов при волочении тонкой проволоки из свинцово-оловянистого припоя с наполнителем из канифоли, а также проволоки из алюминия высокой чистоты.

Установлено, что проволока, протянутая с наложением ультразвуковых колебаний, имеет меньшее удельное сопротивление, что объясняется более совершенной структурой, которая приводит к меньшему рассеянию электронных волн.

Ключевые слова: физико-механические свойства, свинцово-оловянистый припой, ультразвуковые колебания, разупрочняющее действие, прочность структуры.

Введение. Изучение изменения свойств разнородных материалов проводили после волочения тонкой проволоки в обычных условиях и при наложении ультразвуковых колебаний (далее — УЗК). Получение тонкой проволоки из свинцово-оловянистого припоя с наполнением из канифоли и проволоки из алюминия высокой чистоты волочением в обычных условиях представляет большие трудности, поскольку в результате налипания алюминия и неравномерного заполнения канала канифолью у припоя происходят частые обрывы проволоки по выходе из волоки. В целях стабилизации процесса и увеличения единичных и суммарных обжатий проводили исследования по волочению тонкой проволоки из алюминия (А999) и припоя (ПОС-61) с наложением ультразвуковых колебаний.

Волочение тонкой проволоки проводили по схеме (рисунок 1). В качестве источника УЗК применяли преобразователь типа ПМС-1-1 или ПМС-15А-18. При такой схеме волочения в концентраторе просверливали отверстие диаметром 4...6 мм с выходом на боковую поверхность. Протягиваемая проволока через отверстие поступала в волоку под небольшим углом, при выходе из которой закреплялась в захвате волочильной машины.

Амплитуда УЗК на торце концентратора (где была закреплена волока) составляла 18...20 мкм. При включении ультразвука процесс волочения припоя и алюминиевой проволоки стабилизируется

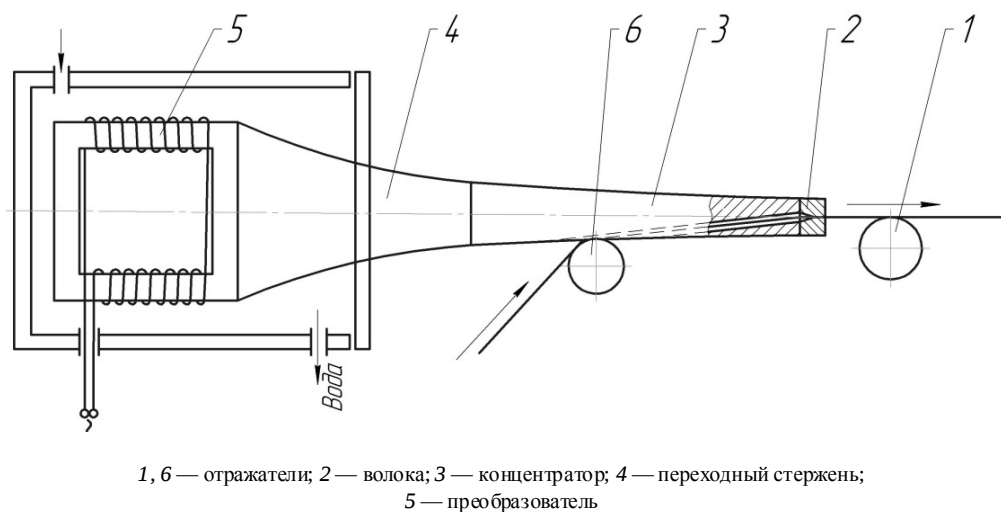


Рисунок 1 — Схема волочения с расположением очага деформации в пучности смещений

(ликвидируются обрывы и налипание), происходит снижение усилия волочения на 50...60%, что позволило увеличить степень обжатия за проход до 60% по сравнению с волочением в обычных условиях без ультразвука.

Кроме изучения силовых параметров и механических свойств, проводили исследования качества поверхности и удельного электросопротивления проволоки после волочения с наложением ультразвука и в обычных условиях.

Механические свойства проволоки, полученной методом волочения, во многом определяют её качество. Изучению влияния циклических нагрузжений на изменение механических свойств металлов и сплавов посвящён ряд работ, из которых следует, что воздействие знакопеременных напряжений растяжения/сжатия на металлы приводит к изменению их свойств. Изменение механических свойств металла при действии УЗК в процессе волочения является следствием ряда факторов, оказывающих разупрочняющее действие на металл.

Известно, что пластическая деформация металла осуществляется путём перемещения дислокаций. По мере увеличения степени деформации плотность их увеличивается, сопротивление смещению дислокаций возрастает, что вызывает увеличение предела прочности металла и снижение относительного удлинения. При волочении с наложением УЗК происходит поглощение акустической энергии деформируемым металлом, что способствует активации задержанных дислокаций. Активации дислокаций в зоне пучности смещений ультразвуковой волны в основном способствуют большие упругие деформации кристаллической решётки. При амплитуде колебаний 18 мкм, когда скорость атомов достигает 2,19 м / с, а ускорение — 265 000 м / с², может иметь место отрыв дислокации от точек закрепления. Поэтому достаточно небольшого внешнего напряжения, чтобы вызвать пластическую деформацию. На процесс разупрочнения влияет также нагрев металла при волочении с ультразвуковыми колебаниями, приводящий к возврату или собирательной рекристаллизации в зависимости от исходной структуры.

Методика исследований. Для проведения механических испытаний были изготовлены образцы из свинцово-оловянистой проволоки ПОС-61 и алюминиевой проволоки А999 с диаметром, который после последнего перехода составлял 0,56 мм. При испытании образцов на растяжение определяли предел прочности σ_b и относительное удлинение δ . Механические испытания на растяжение проводили на испытательной машине на пяти образцах для каждого материала, полученных в обычных условиях и при наложении УЗК, и вычисляли средние значения.

Приведём усреднённые результаты механических испытаний проволоки, полученной волочением с ультразвуком и обычным способом (таблица 1).

Анализ приведённых данных показывает, что предел прочности свинцово-оловянистой проволоки с наполнителем из канифоли и алюминиевой проволоки, протянутых с наложением УЗК, меньше, а относительное удлинение больше, чем у проволоки, протянутой в обычных условиях.

Качество поверхности проволоки после волочения, кроме других факторов, зависит от смазки и чистоты поверхности рабочей части волоки. Для выяснения влияния наложения УЗК на качество поверхности проволоки исследования проводились при соблюдении одинаковых условий волочения. Качество поверхности определяли после волочения в обычных условиях и при наложении продольных УЗК, когда очаг деформации был расположен в пучности смещений колебательной системы. Анализ

Т а б л и ц а 1 — Механические свойства проволоки

Материал	Степень деформации ε , %	Механические свойства			
		Волочение без УЗК		Волочение с УЗК	
		предел прочности, σ_b , МПа	относительное удлинение δ , мм	предел прочности, σ_b МПа	относительное удлинение δ , мм
ПОС-61	7,8	36,6	7,5	35	8,3
А999	7,8	53,6	0,8	31	1,0

качества поверхности проволоки проводили с помощью интерферометра МИИ-4 и двойного микроскопа МИС-II. О чистоте поверхности судили по высоте гребешков (R_z) на поверхности проволоки (таблица 2). Шероховатость поверхности определяли по трём сечениям с шагом 10 мм. В каждом сечении брали четыре точки.

Результаты исследований и их обсуждение. Из полученных данных (см. таблицу 2) следует, что в результате наложения УЗК на проволоку в процессе волочения значительно повышается её чистота поверхности. Данное улучшение, по нашему мнению, объясняется тем, что волока совершает колебания относительно проволоки с отзывом контактируемых поверхностей, в результате чего происходит смятие (сглаживание) микронеровностей на поверхности последней, а также уменьшением контактного трения под действием ультразвука.

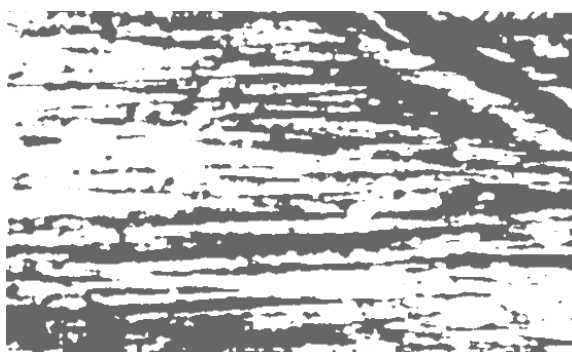
Рассмотрим фотографии поверхности алюминиевой проволоки, полученные с использованием растрового электронного микроскопа, со степенью деформации 23% (рисунок 2, а) и поверхности алюминиевой проволоки, протянутой с наложением УЗК с той же степенью деформации (см. рисунок 2, б). Видно, что поверхность проволоки, протянутая без ультразвука, имеет более широкие и глубокие борозды, по сравнению с поверхностью проволоки, протянутой с наложением УЗК.

Ранее нами [1] было показано, что при волочении проволоки в пучности смещения ультразвуковой волны происходит уменьшение неравномерности деформации по сравнению с обычным волочением.

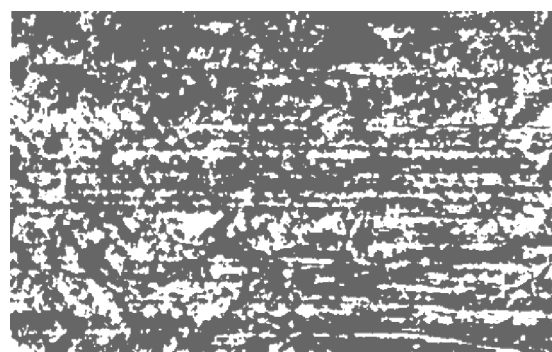
Это объясняется динамическим характером воздействия инструмента на деформируемый металл и связанным с ним уменьшением сил контактного трения. Для более полного изучения причин уменьшения неравномерности деформации при действии ультразвука проведены исследования микротвёрдости алюминиевой проволоки после волочения.

Т а б л и ц а 2 — Высота гребешков на поверхности протянутой проволоки R_z , мкм

Материал	Номер прохода	R_z без УЗК	R_z с УЗК
А999	1	0,78	0,37
	2	0,76	0,36
	3	0,74	0,34
ПОС-61	1	0,8	0,34
	2	0,78	0,35
	3	0,74	0,32



а)



б)

а — без наложения УЗК; б — с наложением УЗК

Рисунок 2 — Изображения поверхностей алюминиевой проволоки во вторичных электронах. $\times 400$

Исследование распределения микротвёрдости в поперечном сечении проволоки, полученной волочением в обычных условиях и с наложением УЗК, позволяет качественно определить влияние ультразвука на характер процесса пластического деформирования при волочении. Алюминиевую проволоку протягивали за два прохода. Затем делали поперечный срез проволоки, приготавливали шлифы и измеряли изменение микротвёрдости по поперечному сечению проволоки.

Усреднённые результаты проведённых исследований микротвёрдости проволоки, протянутой с наложением ультразвука и без УЗК, представлены в виде графиков (рисунок 3).

Анализ полученных данных показывает, что распределение микротвёрдости по поперечному сечению проволоки после волочения неравномерно, причём с увеличением степени деформации микротвёрдость проволоки возрастает (см. рисунок 3). После волочения поверхностные слои проволоки имеют более высокие значения микротвёрдости, чем центральные. При волочении с наложением УЗК кривая распределения микротвёрдости по сечению проволоки имеет более плавный ход, чем при волочении в обычных условиях, причём значение микротвёрдости вблизи поверхности в первом случае меньше, чем во втором (при деформации в обычных условиях), т. е. металл деформируется более равномерно по сечению образца при волочении с ультразвуком. Это объясняется уменьшением сил контактного трения в очаге деформации в результате действия УЗК.

Таким образом, проволока, протянутая с наложением ультразвука, отличается большей равномерностью механических свойств по сравнению с проволокой, полученной обычным способом.

Известно, что свойства деформируемого металла тесно связаны со структурой. При изменении структуры металла в первую очередь происходит изменение их физических и механических свойств. Для изучения влияния ультразвука на структуру были проведены сравнительные микроструктурные исследования алюминиевой проволоки, протянутой с наложением УЗК и в обычных условиях. Границы зёрен выявляли путём кратковременного электролитического вытравливания поверхности шлифа. Полученные таким образом шлифы исследовали на микроскопе МИМ-8. В результате проведённых исследований существенного различия в строении деформируемого металла обнаружено не было. Однако сравнительные исследования показали, что при волочении с ультразвуком в деформации участвует практически весь конгломерат зёрен, в то время как при обычном волочении сохраняются участки с недеформированными зёрнами (отдельные зёрна сохраняют округлую форму). Это подтверждает вышеприведённое предположение, что введение ультразвука в очаг деформации значительно уменьшает неравномерность деформации.

Распределение и величина остаточных напряжений, степень искажённости кристаллической решётки в значительной мере характеризует прочностные и пластические свойства деформированного металла. Изменение характеристик тонкой структуры приводит к изменению электропроводности, теплопроводности и ряда других свойств материалов. Поэтому исследование остаточных напряжений представляет определённый интерес для оценки качества проволоки.

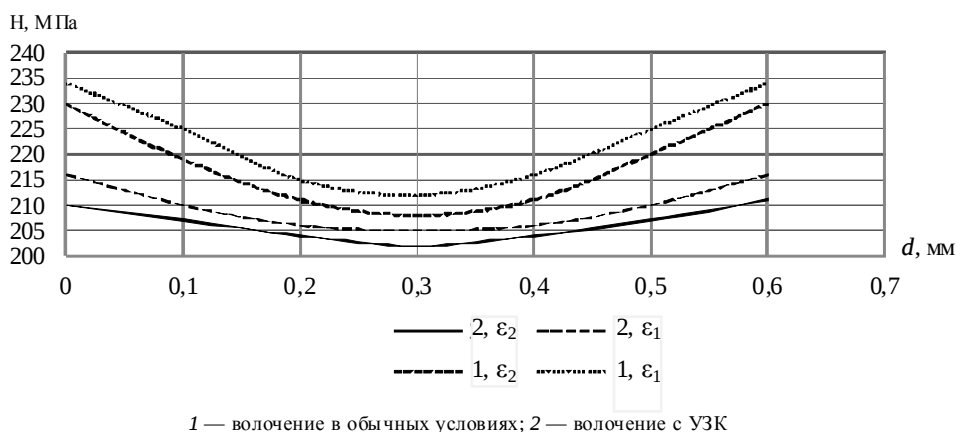


Рисунок 3 — Распределение микротвёрдости в поперечном сечении алюминиевой проволоки после волочения (ϵ_1 равно 12%, ϵ_2 — 6%)

В целях определения влияния ультразвуковых колебаний на величину остаточных напряжений проведены сравнительные рентгенографические исследования проволоки, протянутой с одинаковыми технологическими параметрами за три прохода в обычных условиях и с наложением УЗК.

Рентгенографические исследования проводили на образцах из алюминиевой проволоки на рентгеновской установке УРС-50Н с ионизационной регистрацией рентгеновских дифракционных максимумов в медном излучении. Распределение интенсивности в рентгеновской интерференционной линии регистрировалось на самопишущем приборе ЭПП-09. Для съёмки использовали два интерференционных максимума линии K_α — серии от плоскости (111) с углом дифракции, равным $19^\circ 5'$ и плоскости (331) с углом дифракции, равным $56^\circ 10'$ [2].

На основе результатов рентгенографических исследований определяем величину микроискажений кристаллической решётки образцов $\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$

Зная величину микроискажений кристаллической решётки, определяли остаточные напряжения (σ_0) и плотность дислокаций.

В предположении объёмного напряжённого состояния остаточные напряжения σ_0 определяли по формуле Каглиотти—Закса

$$\sigma_0 = \frac{E}{1-2\mu} \frac{\Delta a}{a},$$

где E — модуль упругости материала;

μ — коэффициент Пуассона.

Для распределения микроискажений кристаллической решётки по Гауссу плотность дислокаций находили по формуле

$$\rho_{\Gamma} = \frac{24E}{5\pi Ib} \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2,$$

где I — модуль сдвига;

b — вектор Бюргера.

Принимая распределение микротвёрдости по Коши, величина плотности дислокаций будет иметь следующее значение:

$$\rho_{\kappa} = \frac{96E}{5Ib} \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2.$$

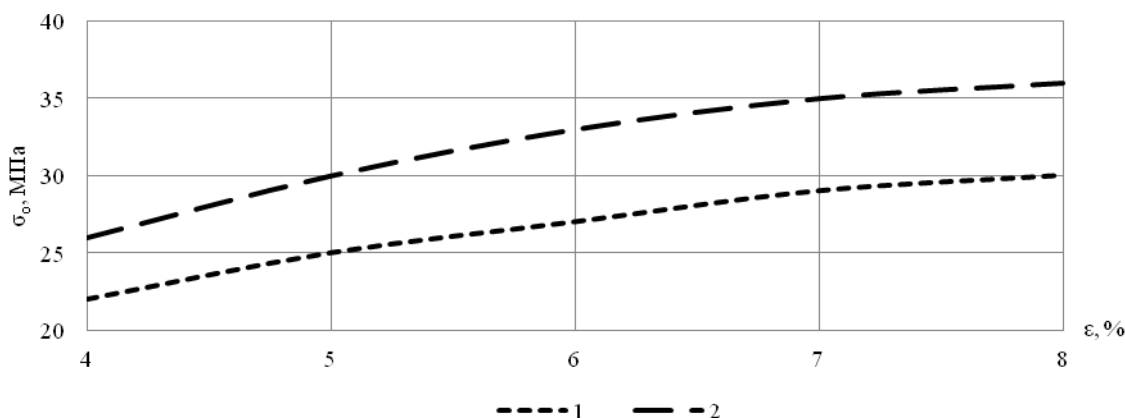
Приведём значения остаточных микроискажений кристаллической решётки $\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$ остаточных напряжений (σ_0) и плотности дислокаций ρ_{Γ} , полученных после волочения в обычных условиях и с наложением УЗК (таблица 3).

Анализ данных показывает, что при волочении с наложением ультразвука происходит изменение характеристик тонкой структуры несколько меньше, чем при волочении проволоки в обычных условиях. Так, величина остаточных напряжений в проволоке, полученной волочением с наложением УЗК, примерно на 15% меньше, чем в проволоке, полученной волочением в обычных условиях; величина плотности дислокаций примерно на 28% меньше, а величина микроискажений кристаллической решётки меньше на 15% (см. таблицу 3).

Рассмотрим изменение остаточных напряжений для проволоки, протянутой обычным способом и с наложением ультразвуковых колебаний в зависимости от степени деформации (рисунок 4). Величина

Т а б л и ц а 3 — Значение характеристик тонкой структуры в образцах после волочения

Материал	Номер прохода	Волочение без наложения УЗК				Волочение с наложением УЗК			
		$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$	σ_0 , МПа	по Гауссу $\rho_{\Gamma} \cdot 10^7$, см ⁻²	по Коши $\rho_K \cdot 10^8$, см ⁻²	$\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-4}$	σ_0 , МПа	по Гауссу $\rho_{\Gamma} \cdot 10^7$, см ⁻²	по Коши $\rho_K \cdot 10^8$, см ⁻²
А999	1	1,04	26,00	2,75	3,41	0,88	22,00	1,96	2,45
	2	1,28	32,00	4,15	5,18	1,07	26,80	2,91	3,63
	3	1,40	35,00	4,96	6,19	1,16	29,00	3,42	4,27

Рисунок 4 — Изменение остаточных напряжений (σ_0) в алюминиевой проволоке после волочения с наложением УЗК (1) и без УЗК (2) в зависимости от степени деформации (ϵ)

остаточных напряжений возрастает по мере увеличения степени деформации как при волочении обычным способом, так и с наложением УЗК. Однако применение ультразвука в процессе пластической деформации способствует уменьшению величины остаточных напряжений, ибо общий уровень напряжений в проволоке, деформированной с УЗК меньше, чем после деформации в обычных условиях.

Уменьшение остаточных напряжений, остаточных микроискажений кристаллической решётки и плотности дислокаций можно объяснить, учитывая особенности, сопровождающие процесс деформации с наложением ультразвука.

Величина остаточных напряжений при волочении проволоки в значительной степени характеризует неравномерность деформации. Установлено [1], что после волочения с наложением ультразвука деформация и микротвёрдость распределяются по сечению проволоки более равномерно и имеют значения несколько меньшие, чем при волочении в обычных условиях. Этот характер изменения деформации и микротвёрдости в общем соответствует изменению тонкой структуры. Кроме того, уменьшение величины остаточных напряжений при деформации с наложением ультразвука связано с процессом разупрочнения металла вследствие поглощения акустической энергии по сравнению с деформацией в обычных условиях.

Заключение. Полученное изменение характеристик тонкой структуры металла, деформированного с наложением УЗК по сравнению с деформацией в обычных условиях является результатом необратимого действия ультразвуковых колебаний на пластически деформируемый металл. Это необратимое действие ультразвука связано со многими процессами, имеющими место в макро- и микрообъёмах металла. К основным процессам можно отнести следующие:

1) уменьшение контактного трения при волочении с наложением УЗК обеспечивает меньшую неравномерность деформации по сечению образца, что приводит к уменьшению остаточных напряжений;

2) исследования развития полос скольжения в образцах при деформации с наложением ультразвука показали, что процесс внутризёрненной деформации происходит интенсивнее, а межзёрненной — медленнее (по сравнению с деформацией в обычных условиях) [1]. Следовательно, остаточные напряжения, плотность дислокаций и упрочнение после деформации с ультразвуком будут меньшими;

3) разупрочняющие процессы, приводящие к перестройке дислокаций в конфигурации с минимумом энергии, также уменьшают остаточные напряжения;

4) локальное повышение температуры ускоряет разупрочняющие процессы, в результате чего уменьшается величина остаточных напряжений.

Известно, что существует глубокая корреляция между структурой материала и его электрическими свойствами. Такая макроскопическая характеристика, как удельное сопротивление, является чувствительным индикатором тонких структурных изменений, происходящих в металлах, в частности, под действием ультразвука. Изменение удельного сопротивления является доказательством наличия изменений в атомной структуре.

Электрическое сопротивление реальных металлов обусловлено тем, что их структура отличается от идеальной кристаллической решётки. В реальных металлах решётка искажена тепловыми колебаниями ионов и всевозможными структурными неоднородностями, например, точечными и линейными дефектами кристаллической решётки. Для кристалла с правильной решёткой без дефектов и примесей рассеяние электронов обуславливается нарушением идеальности распределения узлов вследствие тепловых колебаний и определяется амплитудой тепловых колебаний ионных остовов. В процессе деформации увеличиваются микроискажения кристаллической решетки, образуется большое количество линейных дефектов кристаллической решётки (дислокаций), точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов), которые и обуславливают увеличение электросопротивления.

В результате проведённых исследований установили, что проволока, протянутая с наложением УЗК, имеет примерно на 2...3% меньшее удельное электросопротивление, чем проволока, протянутая в обычных условиях. Уменьшение удельного электрического сопротивления проволоки, протянутой с наложением ультразвука по сравнению с удельным электрическим сопротивлением проволоки, протянутой в обычных условиях, объясняется более упорядоченной (совершенной) структурой, которая приводит к меньшему рассеянию электронных волн.

Следовательно, образующиеся при пластической деформации искажения кристаллической решётки снимаются при наложении ультразвука действием возврата, и удельное электрическое сопротивление проволоки уменьшается.

Список цитируемых источников

1. Клубович, В. В. Влияние ультразвуковых колебаний на характер распределения деформации при волочении / В. В. Клубович, Л. К. Конышев, А. С. Масаковская // *Металлургия* : респ. межведом. сб. — Вып. 5. — Минск : [б. и.], 1974.
2. Рентгенографический и электронографический анализ / С. С. Горелик [и др.]. — М. : [б. и.], 1970.

Материал поступил в редакцию 22.04.2014 г.

The results of the ultrasonic vibrations effect on physical and mechanical properties of dissimilar materials at drawing fine wire made of lead-tin solder filled with rosin and wire high-purity aluminum have been put forward. It has been found out that the wire stretched to overlay the ultrasonic vibration has a lower resistivity that appears to be the result of the improved structure which leads to less scattering of the electron waves.

Key words: physical and mechanical properties, lead-tin, ultrasonic vibrations, softening action, strength of the structure.